

# 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析

赵 研<sup>1,2</sup>, 张丛珊<sup>1,2</sup>, 高 科<sup>\*1,2</sup>, 张增增<sup>1,2</sup>,  
赵大军<sup>1,2</sup>, 李家晟<sup>1,2</sup>, 吕晓姝<sup>1,2,3</sup>, 平天才<sup>4</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;  
3. 阿尔托大学工程学院, 芬兰 埃斯波 00076; 4. 泸西县自然资源局, 云南 红河州 652400)

**摘要:** PDC钻头在软至中硬地层钻进时具有钻速高、使用寿命长、设计灵活等显著优点, 在钻井领域中的需求量逐年增加。而超声波钻进作为一种新型碎岩技术, 由于在钻进过程中具有穿透能力强、钻进效率高等优点而获得了广泛关注。以超声波振动辅助PDC钻头破岩有望取得良好的钻进效果。为此, 基于线型Drucker-Prager模型, 利用ABAQUS软件建立了超声波辅助PDC钻进振动切削岩石的二维有限元模型, 分析了不同超声波振动频率下PDC钻进破岩比功和切削力的变化规律, 比较了超声波振动切削与常规切削岩屑形成过程的差异。研究结果表明, 当激励频率从20 kHz至40 kHz增长的过程中, 破岩比功与平均切削力都呈现先减少后增加的变化趋势, 即存在一个最优频率位于25~30 kHz间, 使破岩比功最小, 钻进效率最高; 超声波辅助振动切削的破岩方式与常规切削的塑性破坏不同, 主要以脆性破坏为主, 其切屑形成过程共分为4个阶段, 且切削力保持为零的阶段较常规切削更为明显; 当激励频率接近岩石固有频率时, 超声波振动切削的平均切削力较常规切削小20.5%, 并更易产生大块岩屑, 使岩石产生更多体积破碎, 从而提高破岩效率。

**关键词:** PDC齿; 超声波钻进; 切削力; 有限元; ABAQUS

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)04-0011-10

## Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter

ZHAO Yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Congshan<sup>1,2</sup>, GAO Ke<sup>\*1,2</sup>, ZHANG Zengzeng<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Dajun<sup>1,2</sup>, LI Jiaosheng<sup>1,2</sup>, LÜ Xiaoshu<sup>1,2,3</sup>, PING Tiancai<sup>4</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Lab of Ministry of Natural Resources for Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Changchun Jilin 130026, China;

3. School of Engineering, Aalto University, Espoo 00076, Finland;

4. Natural Resources Bureau of Luxi, Honghe Yunnan 652400, China)

**Abstract:** PDC bits have the advantages of high rate of penetrate (ROP), long service life and flexible design when drilling in soft to medium-hard formation. The demand of PDC bits in drilling field is increasing yearly. As a new type of rock breaking technology, ultrasonic drilling has attracted wide attention due to its strong penetration and low drilling cost. However, the understanding of the formation mechanism of rock cuttings at micro level and the change of cutting force in the cutting process is not enough, which makes the wide application of this technology limited. In order to

**收稿日期:** 2020-09-08; **修回日期:** 2020-09-14 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.04.002

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“具有优化自锐自修复性能的仿生钻头材料的新理论及设计”(编号:41972324); 国家重点研发计划项目子任务“仿生耦合双钻头自平衡钻具系统研究”(编号:2018YFC0808201-4)

**作者简介:** 赵研, 男, 汉族, 1983年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 主要从事超深科学钻探技术与装备、地下蓄能技术和多相介质耦合传热传质方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, zhaoyan1983@jlu.edu.cn。

**通信作者:** 高科, 男, 汉族, 1977年生, 教授, 博士生导师, 从事超硬材料钻探机具、仿生工程学研究及教学工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, gaokenm@jlu.edu.cn。

**引用格式:** 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 11-20.

ZHAO Yan, ZHANG Congshan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 11-20.

deeply understand the cutting mechanism of ultrasonic drilling, based on the linear Drucker-Prager model and ABAQUS software, a two-dimensional finite element model for ultrasonic vibration assisted rock cutting is established, and the formation mechanism of rock cuttings at micro level of ultrasonic vibration cutting is analyzed and compared with the conventional single tooth cutting process. In addition, the variation law of rock breaking specific work and cutting force at different frequencies is analyzed. The results show that, in the process of ultrasonic vibration assisted cutting, the cutting force decreases to zero more obviously than conventional cutting; when the excitation frequency is close to the natural frequency of rock, ultrasonic vibration cutting has smaller cutting force than conventional cutting, which is conducive to improve the stress state of the tool and reduce the wear degree of the tool; ultrasonic vibration cutting is easier to produce large blocks than conventional cutting when the frequency increases from 20kHz to 40kHz; the rock breaking specific work and average cutting force decrease first and then increase, indicating that there is an optimal frequency at which the specific work of rock breaking is minimum while drilling efficiency is highest.

**Key words:** PDC cutter; ultrasonic drilling; cutting force; finite element; ABAQUS

## 0 引言

由于PDC钻头在软至中硬地层钻进时具有破岩效率高、使用寿命长、稳定性好等显著优点,在钻井工业中发挥着越来越重要的作用。而随油气勘探逐渐向深层推进,低渗透率和高能耗成为了影响钻井效率的主要因素<sup>[1]</sup>。由于深部地层岩石的“三高”(硬度高、研磨性高、可钻性值高)特征尤其显著,使得钻进效率大幅降低,钻进成本明显增加,这对PDC钻头的各方面性能提出了更高的要求。寻求高效破岩新方法成为了深层油气勘探和开发的迫切需求<sup>[2-3]</sup>,为克服钻探新机遇带来的难题,研究人员研发了多种新型PDC新型钻头,例如复合PDC钻头、仿生PDC钻头、PDC-牙轮混合钻头等<sup>[4]</sup>,然而上述钻头在复杂、难钻地层钻进时仍然存在一定局限性。针对我国深层钻进开发不断复杂化等情况,亟需发展新型有效提速降本的钻井技术。

近年来,超声波碎岩方式以其穿透力强、所需轴向力小、钻进成本低等优点而获得了广泛关注。超声波振动碎岩技术是运用超声波碎岩装置将机械振幅施加至岩石,使岩石固有频率(一般在20~40 kHz)和施加给岩石的机械振动频率(可达20 kHz以上)相等而破碎岩石,最终达到高效碎岩目的的新型钻进技术<sup>[4]</sup>。鉴于超声波碎岩具有独特的破岩优势,长期以来大量学者对其进行了相关研究。2000年初,美国国家航天局(NASA)研制出超声波钻探取样器,并利用超声波破岩进行外太空土壤、岩体、冰层的取样。美国共振机器公司开发了利用

岩石共振特性进行碎岩的新型设备,并且运用于实际工程建设中。随后,我国也将此种技术运用于道路路面施工中,并取得了良好的效果。此外,我国学者进行了许多相关研究:黄家根等<sup>[5]</sup>分析了超声波高频旋冲击机理,并建立了数值模型。研究发现,存在最优振动频率使振动效率最高。文杰<sup>[6]</sup>建立了岩石在超声波激励与冲击复合作用下动力学模型,模拟分析岩石裂隙发育特征的影响规律。袁鹏<sup>[7]</sup>分析了超声波振动时间对碎岩损伤影响的规律,并提出了超声波振动时间阈值的概念。仿真分析得到,在试验条件下,当超声波振动时间处于15~20 min时岩石模型单元破坏速度最大。尹崧宇<sup>[8]</sup>利用ANSYS与MATLAB软件建立了超声波载荷破碎花岗岩的数值模拟模型,讨论了超声波振动下花岗岩裂纹的变化特性,得到:当振动频率与花岗岩固有频率相同时,应力、应变达到最大值。Liu W等<sup>[9]</sup>建立了PDC单齿回转冲击切削的三维有限元模型。讨论了裂纹扩展、切屑形成、损伤演化、力学比能等问题。得到:在冲击回转切削时,硬岩更容易发生脆性破坏,并且回转冲击钻进技术可以保护刀具使其不易受磨损,并提高了钻进效率。李思琪等<sup>[10]</sup>应用MATLAB软件对高频谐波振动冲击破岩进行了分析求解,结果表明,在高频谐波振动冲击作用下,破岩效率可比普通切削提高13.2%,并且当激励频率与岩石的固有频率接近时机械钻速也会随之增长。

由于在面对复杂、难钻地层时,单一的破岩方法已很难完全满足高效、节能的破岩需求,因此本

文将超声波辅助碎岩方式与PDC钻进相结合,以提升岩石破碎效率,降低岩石破碎难度。然而,目前大多数关于超声波碎岩的研究主要集中在破碎裂纹的产生与变化规律方面,对超声波辅助PDC切削齿振动碎岩过程中刀具的运动形式,以及动态破岩效率等进行的相关研究还比较少,关于超声波碎岩的切削机理与切削力的变化规律与还未见研究人员进行相关讨论。因此本文利用ABAQUS软件建立了超声波辅助PDC钻进振动切削岩石的二维有限元模型,分析了不同超声波振动频率下PDC钻进破岩比功和切削力的变化规律与切屑形成过程,以达到提升破岩效率的目的。

## 1 超声波振动高效破岩技术优点

### 1.1 疲劳损伤累积快

超声波振动具有高频率、高振动力、低振幅的特点,在超声波振动作用下,疲劳破碎起到辅助作用,岩石累积疲劳损伤的速度变快,在此过程中达到失效的作用时间短,岩石内部存在的天然裂缝产生细小裂纹,快速延伸贯通,导致岩石突然断裂而发生整体破坏,如图1所示。因此较一般破碎方式而言,超声波载荷可以有效加快岩石破碎效率。

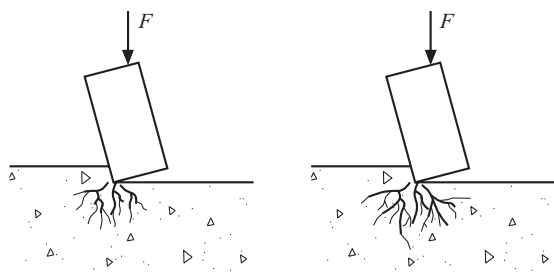


图1 超声波载荷冲击作用下岩石裂纹发展示意

Fig.1 Crack development diagram of rock under ultrasonic load impact

### 1.2 加载应力波能量密度高

在超声振动破碎岩石的损伤累积阶段,每一次振动输出的能量一部分以弹性波形式向外无用耗散,余下用于裂纹扩展和新表面的形成<sup>[8]</sup>。由于超声波载荷具有超高频特性,在破碎岩石过程中不断对岩石施加周期性交变载荷,使每一次切削齿与岩石接触时的瞬时接触应力大、应力波能量密度高,有利于超过岩石损伤的最小阈值,加速岩石裂纹产生、发展与合并。较常规切削,超声波碎岩可以在

岩石破碎过程中以更短的能量累积时间有效破碎岩石,使岩石快速累积损伤,以达到高效破岩的目的。

### 1.3 利用共振特性破碎岩石

完整致密岩石的固有频率一般在20~40 kHz,而超声波碎岩装置施加给岩石的频率可达20 kHz以上。因此,可通过调节超声波碎岩装置的参数达到岩石固有频率,与岩石产生共振,使岩石内部整体振动达到峰值,加速裂纹扩展。此时,岩石内部破碎速度加快,强度降低,切削齿可在更小的切削力下破碎岩石,从而降低刀具磨损程度,提高破岩效率。另外,钻头的周期性振动还会影响钻井液流动,使井底流场产生脉动效应,迫使岩屑颗粒翻转、流动,提高井底的净化程度<sup>[11]</sup>。

## 2 超声波振动切削数值模拟

### 2.1 有限元模型的建立

根据圣维南原理,岩石体积应为PDC刀具体积的5~10倍,为保证计算准确性的同时减少计算时间,设置岩石几何模型为100 mm×30 mm,PDC刀具直径13.44 mm,厚度8 mm。对岩石的左侧与下侧进行固定。模型网格划分以四边形网格为主,对岩石上部与刀具前端进行网格加密,其余部分采用稀疏网格划分。网格类型采用温度-位移耦合,CPE4RT,沙漏控制缩减积分。模型共划分为14953个网格(15143个节点)。网格划分结果如图2所示。

使用切削具的线速度 $v$ 可以消除口径的影响,在模拟中可以用来代替转速 $n$ 。转速 $n$ 与线速度 $v$ 的关系为:

$$v = \frac{1}{60} \pi D n \quad (1)$$

根据公式(1),取切削速度1000 mm/s,切削深度2 mm,切削齿前倾角为15°,超声波振动幅值固定为40 μm。岩石材料与PDC切削齿材料主要物性参数见表1。

### 2.2 线型Drucker-Prager模型

一个合适的塑性本构模型是准确模拟屈服、硬化和破坏过程的关键。但由于岩石的脆性、各向异性、耐磨性、剪切伸长率等复杂的物理性质,使得建立恰当的岩石的材料参数设定较为困难<sup>[12-13]</sup>。Drucker-Prager模型反映了体积应力对材料强度的

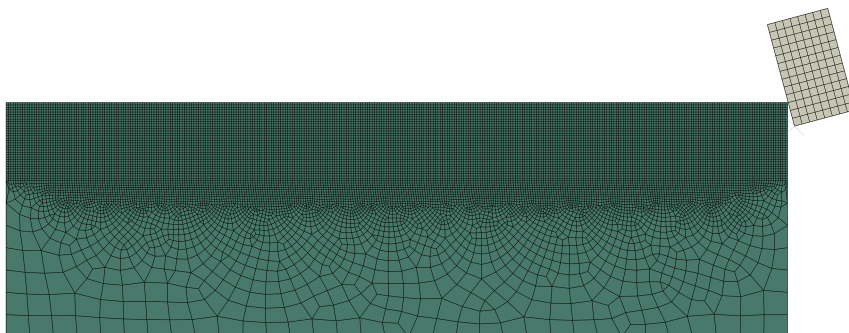


图2 模型网格划分结果

Fig.2 Result of model meshing

表1 岩石与切削齿参数

Table 1 Parameters of rock and cutting teeth

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松 比	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	抗剪强 度/MPa	内摩擦 角/(°)
岩石	2840	0.17	31	6.76	17.72	43.62
切削齿	15000	0.22	580			

影响,将偏应力作为材料损伤的原因,并充分考虑到了井底岩石的颗粒性质、岩石单元在受到剪切力时发生膨胀等影响因素,适用于模拟岩石切削。因此,本文选用Drucker-Prager模型来评价岩石是否达到屈服状态。

图3表示线型Drucker-Prager模型的屈服面,所代表的屈服表达式为<sup>[14]</sup>:

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (2)$$

式中: $p$ ——等效压应力, $p = (2\sigma_3 + \sigma_1)/3$ ,MPa; $\beta$ ——投影在 $p$ - $t$ 应力面上的线性屈服面斜率,通常指摩擦角 $\varphi$ ,( $^\circ$ ); $d$ —— $p$ - $t$ 应力面上的线性屈服面在 $t$ 轴上的截距,与材料的粘聚力有关,MPa; $t$ ——另一种形式的偏应力,可以更好地反应中主应力的影响,其表达式为<sup>[15]</sup>:

$$t = \frac{1}{2} q \left[ 1 + \frac{1}{k} - \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (3)$$

式中: $q$ ——偏应力,为等效应力; $r$ ——偏应力的第三不变量; $k$ ——三轴抗压强度与三轴抗压强度的比值,控制屈服面与主应力的关系。

### 2.3 岩石损伤演化

岩石损伤的应力-应变特征曲线如图4所示,虚线表示无损伤应力-应变曲线,实线表示损伤后应力-应变曲线<sup>[16]</sup>。由于弹塑性材料存在各向同性硬化现象,岩石损伤表现为应变软化 $D\bar{\sigma}$ 和弹性退化

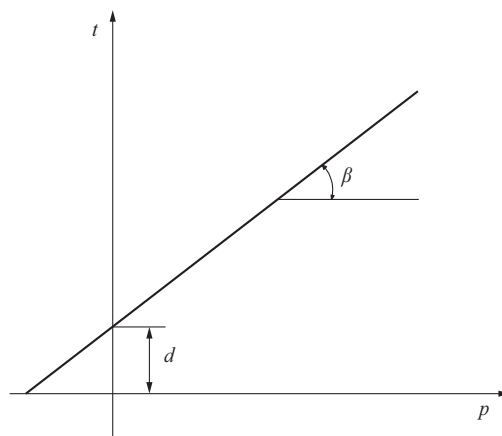
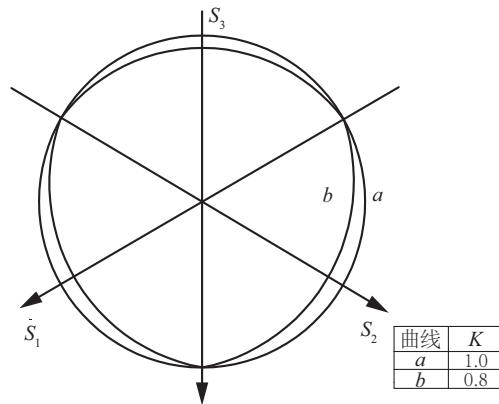
(a) 线性典型D-P模型中 $p$ - $t$ 关系曲线(b)  $\pi$ 平面中线性D-P模型典型的屈服/流动面

图3 线性Drucker-Prager模型屈服面

Fig.3 Yield surface of the linear Drucker-Prager model

(1-D) $E$ 现象。当满足下式时,破坏准则开始激活:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_0^{pl}(\eta, \bar{\epsilon}^{pl})} = 1 \quad (4)$$

式中: $\bar{\epsilon}^{pl}$ ——损伤开始时的等效塑性应变, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ——等效塑性应变速率, $\omega_D$ ——随塑性应变增长的损伤变量。



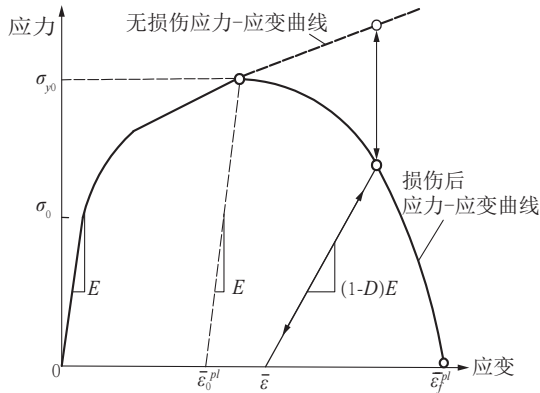


图4 岩石损伤应力-应变特征曲线

Fig.4 Damage stress vs strain characteristic curve of rock

图4中 $D$ 代表损伤因子, $D=0$ 表示岩石第一次达到屈服面并开始失效,此时对应的屈服应力 $\sigma_{y0}$ 为临界屈服应力,对应的塑性应变 $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ 为临界塑性应变,在此阶段,岩石的硬度随 $\bar{\epsilon}^{pl}$ 的增加而降低; $D=1$ 表示岩石能量释放等于材料断裂能,岩石单元完全失效,从岩体上脱落,此时对应的塑性应变 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 为岩石完全失效时的等效塑性应变。即,当刀具开始切削岩石,岩石发生塑性变形,当塑性变形累积到一定阈值时,岩石发生破坏。一旦塑性应变达到岩石的等效塑性应变,岩石单元就会完全失效,从岩石上脱落<sup>[14]</sup>,用公式表达为:

$$\bar{\epsilon}^p \leq \bar{\epsilon}_f^{pl} \quad (5)$$

#### 2.4 破岩效率评价方法

破岩比功的概念最早由Teale<sup>[17]</sup>提出,是衡量钻井效率的重要指标。破岩比功的概念为:破碎单位体积岩石所耗费的能量。破岩比功越低,破岩效率越高。其表达式为:

$$MSE = \frac{W}{V} = \frac{F_h d}{A d} = \frac{F_h}{A} \quad (6)$$

式中: $MSE$ ——破岩比功, $J/m^3$ 或 $Pa$ ;  $W$ ——钻齿所消耗的总功, $J$ ;  $V$ ——破碎岩石的体积, $m^3$ ;  $F_h$ ——切削力, $N$ ;  $d$ ——切削行程, $m$ ;  $A$ ——切削面积, $m^2$ 。

式(6)化简了 $MSE$ 的计算方法,因此本文以平均切削力与平均切削面积的比值作为评价PDC齿切削效率的指标。

### 3 模拟结果与讨论

#### 3.1 不同激励频率对岩石破碎的影响

激励频率对超声波振动碎岩效率有着重要影响

响,当激励频率达到或接近岩石固有频率时,岩石会在外部的激励下发生共振现象,在此时岩石极不稳定,响应的位移以及加速度最大,岩石最容易在轻易扰动下发生破坏<sup>[8]</sup>。图5所示为PDC切削齿以1 m/s的切削速度,分别以不同的超声波振动频率(20、25、30、35、40 kHz)切削岩石时破岩比功和切削力的变化情况。

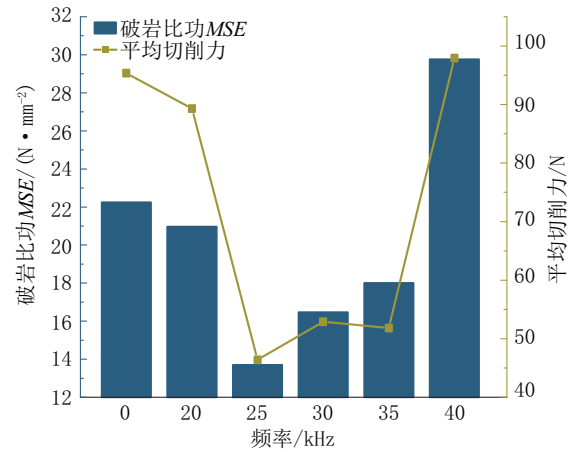


图5 不同振动频率下的破岩比功与平均切削力的变化

Fig.5 Rock breaking specific work and average cutting force at different vibration frequencies

由图5可以看出随超声波振动频率的增加,破岩比功呈先下降后增加的趋势。在振动频率为25~30 kHz时,破岩比功达到最小值。这是由于在振动频率较低时,岩石表现为不受外在激励或激励频率远小于其固有频率,此时岩石的振动幅值与常规PDC切削区别不大,振动对岩石的动态响应不明显。由于超声波振动无法起到使岩石达到共振的效果,这一频率范围又被称为“准静态区”或“刚度区”。在这一区域内,振动系统的特性主要是弹性元件作用的结果<sup>[6]</sup>。在振动频率较高时,由于岩石存在惯性影响,在高频率下不能及时做受迫振动,因此在这一频率范围内振动幅值同样较小。当振动频率处于25~30 kHz附近时,激励频率与岩石的固有频率接近,此时岩石的稳态响应速度、加速度和位移幅值都达到了最大,其内部应力应变也达到了峰值,内部裂纹扩展较快<sup>[16]</sup>。因此,超声波破碎岩石在这一频率范围内的破碎效率较高,可以起到有效加快岩石破碎的效果。在实际工程应用中也应通过实验手段准确测得岩石固有频率,并在钻进时调节工具头的振动频率,使其与岩石固有频率

一致,从而让岩石产生共振,达到高效碎岩的目的。

此外,不同激励频率下的平均切削力基本也与破岩比功呈现相同的变化趋势,并且在 25 kHz 时达到了最小值。这是由于在激励频率达到岩石固有频率时,岩石破碎更为剧烈,此时裂纹的加速扩展使得岩石产生更多的脆性破碎,使得刀具在更小的切削力下可以破碎更多的岩石,在钻进时所需的轴向力更小。有利于改善刀具的应力状态,减小刀具的磨损程度,提高刀具寿命。

### 3.2 超声波振动切削与常规切削破岩机理比较

由于超声波振动存在高频低振幅特性,在宏观上很难观察到超声波切削碎岩的过程。因此,取岩石模型  $0.1\text{ mm} \times 0.03\text{ mm}$ ,分别取振动频率 25 kHz 和不施加超声波振动载荷,其余条件不变,在微米级层面观察其切削机理。

超声波振动一个振动周期内岩屑形成示意图如图 6 所示,一个切削周期内位移与切削力变化对应如图 7 所示。将一个振动周期内切屑的形成分为 4 个阶段:a—b 阶段为刀具由波峰移动至波谷的过

程,与 PDC 单齿切削相同,初始切削时刀尖与岩石接触处产生较高的应力,此部分岩石首先产生弹性变形,除前刀面不断挤压破碎岩石外,后刀面也对岩石会产生一定的压应力,在此过程中切削力不断波动上升(图 6a、b);b—c 阶段为刀具从波谷移动至波峰的初始阶段,此时刀具切削模式由后刀面挤压岩石为主转变为前刀面剪切破碎岩石,刀具不断上升前进,由于刀具上部致密岩石的压实作用,岩石的内能和应变不断积累,产生变形,导致切削力增长幅度大,达到一次切削过程中的峰值(图 6c);在 c—d 阶段,由于岩石不断受到上升刀具的剪切作用,岩屑沿应力相等的剪切面产生滑移,大块岩屑形成,切削力开始逐步下降,但由于刀具前刀面仍然存在残余岩石未破碎,因此刀具在接触下一个切削区域时会不断产生小的应力峰值(图 6d);在 d 阶段后,前刀面岩屑全部切削完成,产生大块岩屑,岩石中累积的能量被释放,切削力下降为 0,至此完成了一个正弦切削周期。

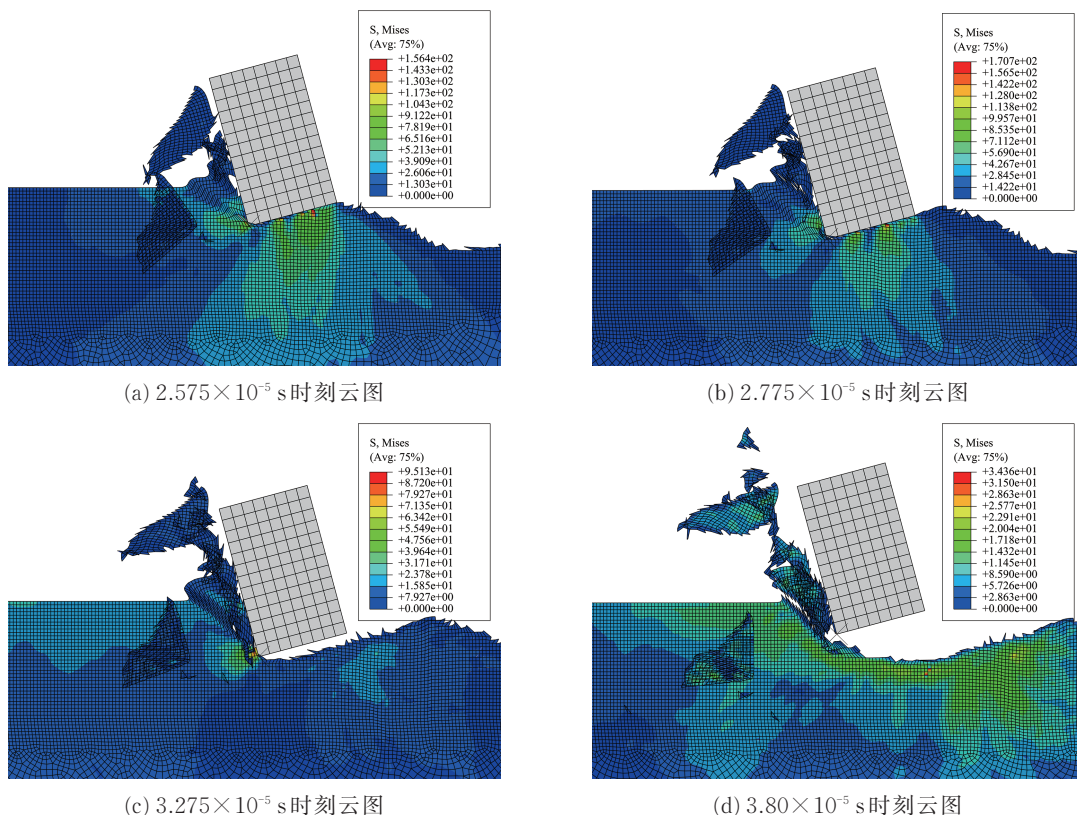
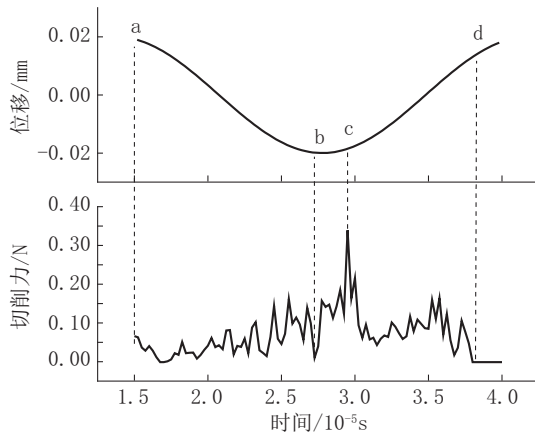
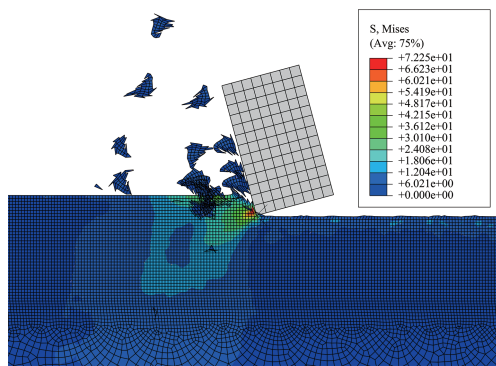
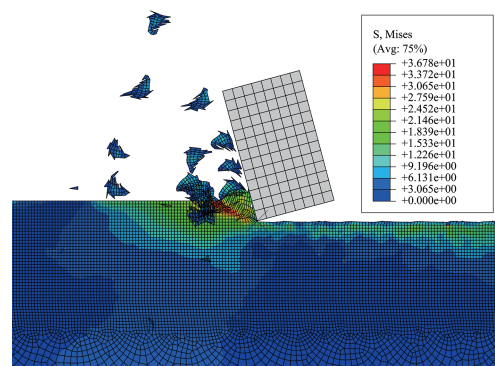
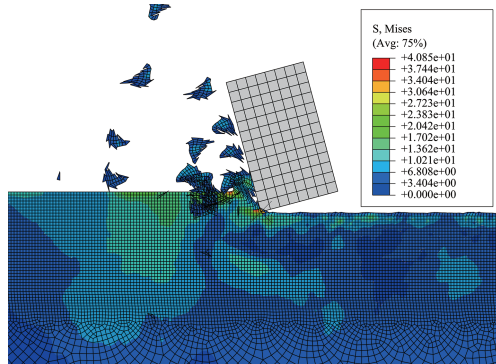
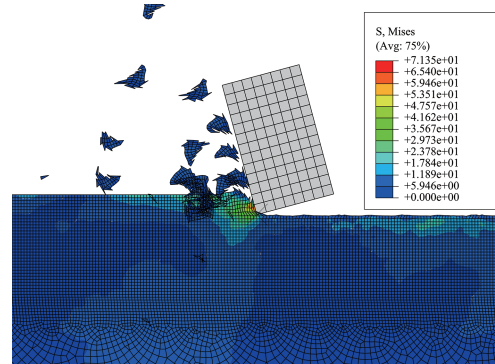


图 6 一个振动周期内岩屑形成示意( $\mu\text{m}$ 级)

Fig.6 Schematic diagram of cuttings formation in one vibration cycle ( $\mu\text{m}$  level)

图7 一个切削周期内位移与切削力变化( $\mu\text{m}$ 级)Fig.7 Displacement vs cutting force in one cutting cycle ( $\mu\text{m}$  level)

PDC钻头在井下高速旋转且处于高温环境,使得常规PDC齿在井下切削岩石的过程与金属切削类似<sup>[18]</sup>。一个切削周期内岩屑形成示意图如图8所示。观察图8,岩石与刀具接触部分首先会出现明显的应力集中,由于刀尖处岩石所受压力最大,此时接触点的高应力使得岩石内部出现开始弹性变形,随切削齿不断向前挤压,岩石内部的剪切应力不断增大,并且开始向外部延伸(图8a);在某一时刻,岩石的剪切应力达到了屈服强度,岩石开始沿剪应力相等的某一剪切面产生滑移(图8b);随刀具不断前进,岩屑逐渐形成(图8c);最后岩石以滑移变形方式形成岩屑,并沿刀具面逸出,开始下一个切削周期(图8d)。

(a)  $5.85 \times 10^{-5}$  s时刻应力云图(b)  $6.025 \times 10^{-5}$  s时刻应力云图(c)  $6.15 \times 10^{-5}$  s时刻应力云图(d)  $6.225 \times 10^{-5}$  s时刻应力云图图8 常规切削一个切削周期内岩屑形成示意( $\mu\text{m}$ 级)Fig.8 Schematic diagram of cuttings formation from conventional cutting in one cutting cycle ( $\mu\text{m}$  level)

通过对一个切削周期内岩屑形成的分析可以发现,单齿PDC切削的碎岩机理为:PDC齿在轴向钻压作用下压入岩石,在扭矩作用下向前移动剪切破碎岩石。在PDC齿切削岩石初期,刃尖附近的岩石形成塑性区和高应力区,最先产生微裂纹;随

PDC切削齿不断向前移动,刃尖处的微裂纹不断发展,向外延伸;当微裂纹发展贯穿至岩石自由表面时,剪切面形成,岩屑脱落,完成了一次剪切破碎。

图9为常规切削与超声波振动切削的切削力对比图。超声波振动切削的平均切削力为0.0625 N,



而常规切削的平均切削力为0.0792 N,切削力约减小20.5%。由岩屑形成过程分析可知,刀具在简谐运动过程中更易产生大块岩屑,使岩石发生脆性破碎。并且当超声波振动的激励频率接近岩石固有频率时,岩石的破碎速度加快,有利于裂纹的产生、扩展与贯通,减小了刀具受力程度,使得平均切削力偏低。另外,相比于常规切削,超声波碎岩过程中切削力为零的阶段更加明显(图9圆圈部分),这主要是由于在切屑形成过程中的c-d阶段,刀具前刀面岩石形成岩屑的剪切面与刀具位移方向基本平行,导致刀具前方处于无残余岩石的状态,切削力保持为零。对于常规切削的切屑形成过程(图8),一旦岩屑形成沿刀具前面逸出后切削力下降为零后刀尖马上开始接触余下部分的残余岩石,开始下一个岩屑形成周期。因此在微观层面,超声波碎岩切削力为零持续时间相对于常规切削更久,从而有利于减轻刀具磨损,改善切削齿应力状态。

图10为常规PDC齿切削与超声波振动切削未变形岩石的塑性应变云图。其中红色区域代表最大塑性变形,此部分岩石产生了大变形与结构破坏,由于其尺寸产生了较大变化,因此未形成大块岩屑;图中红色区域包围起的部分(圆圈部分)表示此处岩石塑性应变为零,即尺寸与结构没有发生破

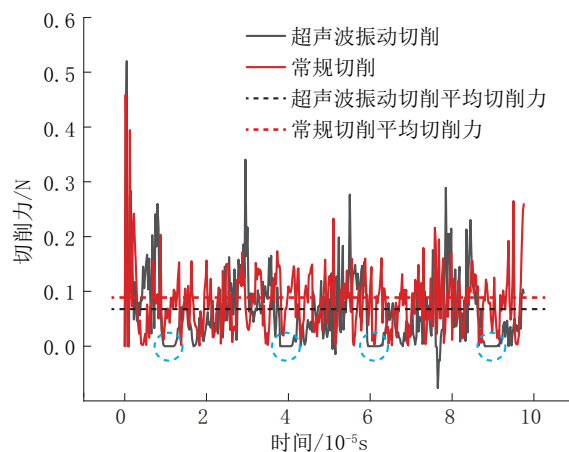


图9 常规切削与超声波振动切削切削力对比( $\mu\text{m}$ 级)

Fig.9 Comparison of cutting force between conventional cutting and ultrasonic vibration cutting ( $\mu\text{m}$  level)

坏,为切削过程中产生的大块岩屑。从图中可以看出常规切削与超声波振动切削的塑性应变云图差别显著,在常规切削中产生岩屑体积较小,塑性变形更为剧烈,此时塑性破坏起主导作用,产生了更多的岩石变形与热积累(图10a);而超声波振动碎岩产生了大块岩屑,表示此时在岩石破碎过程中脆性破坏起主导作用,岩石内部塑性流动减弱,变形减少<sup>[19]</sup>,从而提高了破岩效率(图10b)。

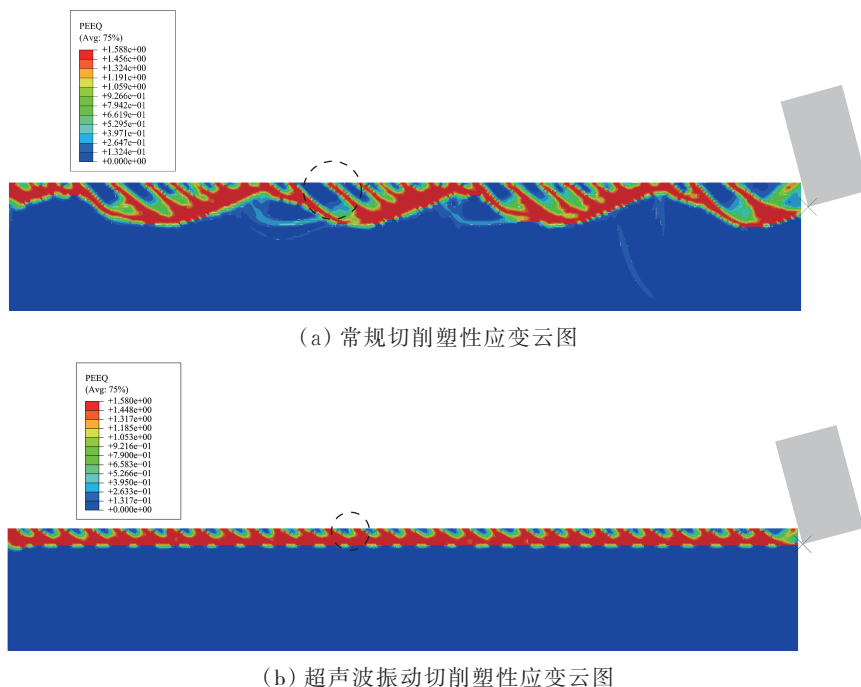


图10 超声波与常规切削塑性应变对比云图( $\mu\text{m}$ 级)

Fig.10 Comparison nephogram of plastic strain between ultrasonic cutting and conventional cutting ( $\mu\text{m}$  level)



综上所述,超声波振动破岩与常规破岩存在的不同之处主要表现在:

(1)当激励频率接近岩石的固有频率时,超声波振动切削的平均切削力较常规切削小20.5%。此时岩石内部裂纹扩展速度加快,使得切削具在更小切削力的作用下可以破碎更大体积的岩石,从而保护刀具,使其不易被磨损。

(2)超声波振动切削过程中切削力保持为零的阶段较常规切削更明显,这主要是由于刀具做简谐运动时的上升阶段,刀具前刀面岩石沿剪切面滑移形成岩屑,刀具前方处于无残余岩石的状态,使切削力保持在零的阶段较长。

(3)切削过程中产生的体积破碎更多。由于单次超声波振动冲击力作用时间短,岩石的瞬时接触应力大<sup>[20]</sup>,宏观层面裂纹不稳定扩展、延伸、贯通,有利于裂纹的产生,从而加速了岩石破碎。

#### 4 结论

建立了PDC齿在不同超声波振动频率下的二维切削模型,得到了破岩比功和切削力随超声波振动频率增长的变化规律;分析了超声波辅助振动切削过程中切屑形成机理,将切屑形成过程分为了4个阶段,并与常规切削进行了切削力、切屑形成过程、岩石塑性应变云图的对比。结果表明:

(1)通过施加不同的激励频率对岩石进行超声波破碎,发现在频率从20 kHz至40 kHz增长的过程中,破岩比功和平均切削力都呈现先减少后增加的变化趋势。这表明存在一个最优频率(本文为25~30 kHz之间)使得破岩比功最小,破碎岩石的效率最高,此频率与岩石的固有频率相等。并且在此激励频率的作用下,平均切削力也达到最小值,从而减小刀具的磨损程度,提高刀具的寿命。

(2)当激励频率接近岩石的固有频率时,超声波振动切削的平均切削力较常规切削小20.5%,此时岩石内部裂纹扩展速度加快,使得切削具可以在更小切削力的作用下破碎大体积岩石,从而保护刀具,使其不易被磨损。

(3)切削力为零的阶段较常规切削更明显。这主要是由于刀具做简谐运动时的上升阶段,刀具前刀面岩石沿剪切面滑移形成岩屑,刀具前方处于无残余岩石的状态,使切削力保持在零的时间较长。

(4)切削过程中形成的切屑体积更大,产生的

体积破碎更多。由于单次超声波振动冲击力作用时间短,岩石的瞬时接触应力大,并且在超声波振动过程中裂纹不稳定扩展、延伸、贯通,有利于大块岩屑的产生,从而加速了岩石脆性破碎。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘杰,黄立新,董佳灵,等. PDC钻头破岩机理的研究[J]. 计算机时代, 2019(6): 5-8.  
LIU Jie, HUANG Lixin, DONG Jialing, et al. Study on rock breaking mechanism of PDC bit [J]. Computer Age, 2019(6): 5-8.
- [2] 柳贡慧,李玉梅,李军,等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 10-15.  
LIU Gonghui, LI Yumei, LI Jun, et al. New technology of composite percussive rock breaking drilling [J]. Petroleum drilling technology, 2016, 44(5): 10-15.
- [3] 王德余,李根生,史怀忠,等. 高效破岩新方法进展与应用[J]. 石油机械, 2012, 40(6): 1-6.  
WANG Deyu, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Progress and application of new efficient rock breaking methods [J]. Petroleum Machinery, 2012, 40(6): 1-6.
- [4] 张春亮. 交叉刮切PDC钻头破岩机理及设计理论研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.  
ZHANG Chunliang. Study on rock breaking mechanism and design theory of cross scraping PDC bit [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [5] 黄家根,汪海阁,纪国栋,等. 超声波高频旋冲钻井技术破岩机理研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 23-29.  
HUANG Jiagen, WANG Haige, JI Guodong, et al. Study on rock breaking mechanism of ultrasonic high frequency rotary percussion drilling technology [J]. Petroleum Drilling Technology, 2018, 46(4): 23-29.
- [6] 文杰. 超声波激励与机械冲击复合破岩机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.  
WEN Jie. Study on the mechanism of composite rock breaking by ultrasonic excitation and mechanical impact [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [7] 袁鹏. 超声波振动岩石破坏速率的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
YUAN Peng. Study on failure rate of rock under ultrasonic vibration [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [8] 尹崧宇. 超声波振动下花岗岩裂纹变化特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
YIN Songyu. Study on variation characteristics of granite cracks under ultrasonic vibration [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [9] Liu W, Zhu X, Li B. The rock breaking mechanism analysis of rotary percussive cutting by single PDC cutter [J]. Arabian Jour-

- nal of Geosciences, 2018, 11(9):192.
- [10] 李思琪, 闫铁, 李玮, 等. 高频谐波振动冲击破岩机制及试验分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4):85-91.  
LI Siqi, YAN Tie, LI Wei, et al. Rock breaking mechanism and experimental analysis of high frequency harmonic vibration impact[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015, 39(4):85-91.
- [11] 马清明. 水力脉冲诱发井下振动钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1):12-14.  
MA Qingming. Downhole vibration drilling technology induced by hydraulic pulse[J]. Petroleum Drilling Technology, 2005, 33(1):12-14.
- [12] Yang Y, Zhang C, Lin M, et al. Research on rock-breaking mechanism of cross-cutting PDC bit[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 161:657-666.
- [13] Liu W, Dan Z, Jia Y, et al. On the statistical damage constitutive model and damage evolution of hard rock at high-temperature[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4):4307-4318.
- [14] 林兆虎. 新型非平面PDC切削齿的研究与设计[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.  
LIN Zhaohu. Research and design of new non-planar PDC cutting teeth [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [15] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:1321-1325.  
FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010:1321-1321.
- [16] 祝效华, 但昭旺. PDC切削齿破碎干热岩数值模拟[J]. 天然气工业, 2019, 39(4):125-134.  
ZHU Xiaohua, DAN Zhaowang. Numerical simulation of dry hot rock crushing by PDC cutting teeth [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4):125-134.
- [17] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 1(2):57-73.
- [18] 李兵. PDC钻头谐振冲击下岩石破碎模拟研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.  
LI Bing. Simulation of rock fragmentation under resonant impact of PDC bit [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [19] Gao M, Zhang K, Zhou Q, et al. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 190:107120.
- [20] 赵大军, 周宇, 尹崧宇, 等. 超声波振动花岗岩破碎机理初探[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社, 2017:47-52.  
ZHAO Dajun, ZHOU Yu, YIN Songyu, et al. Preliminary study on the fracture mechanism of granite by ultrasonic vibration[C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Nineteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conferences. Beijing: Geological Publishing House, 2017:47-52.

(编辑 周红军)